基于空-地协同调查的西天山阿尔先沟雪崩过程数值模拟

张天意[1,2]， 刘 杰[1,2]， 杨治纬[2]， 王 斌[2]， 程秋连[1,2]

（1. 新疆农业大学交通与物流工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司科技研发中心，新疆 乌鲁木齐 830006）

摘 要：为精确识别雪崩流动特性及流态信息，全面分析其运动过程。本研究基于无人机倾斜摄影技术获取高分辨率航拍数据，以阿尔先沟雪崩易发区为例，通过现场调查、无人机遥感解译精细探测雪崩活动过程，确定RAMMS模型输入参数，在此基础上对不同类型雪崩事件进行模拟和重建，对比分析传统地面调查、无人机遥感解译结果与模拟结果的差异，探讨不同类型、不同雪层释放条件下雪崩活动过程。研究结果表明：(1) 以倾斜摄影技术为核心的雪崩调查分析体系，将传统的地面调查方法结合无人机遥感和数值模拟相互验证，提高了灾害发育状况评估的准确性。(2) 2月中旬阿尔先沟坡面积雪厚度趋近于临界厚度值，持续降雪使雪层失稳触发新雪雪崩。调查时仍处于灾害孕育阶段，雪层裂缝加剧变形，风力作用下雪檐自重逐步增大，有超过雪的抗断强度的趋势，整体稳定性较差。(3) 以坡面上方积雪平台为潜在释放区的坡面型雪崩，释放量可达8.2669×10^4 m^3，运动时长约为128 s，并在120 s内堆积区流动高度达到最大，约为3.55 m，最大流动速度为18.34 m·s^{-1}，最大冲击力可达到32.67 kPa，形成面积3369.7 m^2，体积1.8525×10^4 m^{3}的堆积体。通过相互验证，坡面型雪崩并非积雪平台的释放，地面调查结果与数值模拟解译结果存在差异。(4) 沟槽—坡面复合型雪崩为沟槽坡面雪层断裂释放且断裂深度仅为临界厚度值的60%左右，雪崩持续时间接近于300 s，堆积区最大流动速度6.58 m·s^{-1}，最大冲击力17.97 kPa，平均堆积深度为1.64 m，影响范围1178.5 m^2，堆积量3107.76 m^3，地面调查结果与数值模拟结果一致。研究结果一定程度上提高了雪崩事件信息获取的准确性，可为今后雪崩潜在危险预测、风险规避及灾害应急处置提供强有力的数据支撑及科学依据。

关键词：雪崩；无人机；倾斜摄影；数值模拟；运动特征

雪崩是气象、雪特性、地质地貌等因子协同作用下，山坡积雪失稳引起的严重自然灾害[1-2]，其不仅阻碍着区域交通、旅游业、农林牧生产发展，而且威胁着人民生命财产安全，给社会造成了巨大压力[3]。随着山区经济的快速发展，我国对雪崩防治工作提出了更高要求[4-5]。而雪崩调查研究工作是关系防治工作科学性和有效性的基础，因此亟待开展雪崩调查研究，以更详细和准确的调查资料支撑决策者对于雪崩风险评判。

雪崩运动轨迹、运动特征等是灾害防治的关键因素。然而，目前针对大规模雪崩的调查研究，受限于高寒山区恶劣自然条件、地形条件和交通可达性的影响，传统的人工地面调查方式往往不能全面、客观地对雪崩运动轨迹做出准确描述且会耗费大量的人力和时间成本[4,6]。因此，迫切需要发展能够快速、全面、精准描述雪崩运动过程的新技术。

近年来，无人机航摄系统因其高时效、高分辨率、低成本、低损耗、低风险及可重复等诸多优势，被越来越广泛地应用于灾害调查等领域[7-8]。鲁恒等[9]提出无人机获取的影像在三维可视化中能提供更详细、更丰富的几何和语义信息。赵星涛等[10]在无人机低空摄影技术获取的高分辨率正射影像及大场景立体正射影像基础上对矿山地质灾害进行建模分析，精细探测灾害活动过程并定量与定性分

收稿日期：2023-05-19； **修订日期：**2023-07-11

基金项目：交通运输行业重点科技项目(2022-ZD6-090)；新疆交通运输科技项目(2022-ZD-006)；新疆交投集团2021年度“揭榜挂帅”科技项目(ZKXFWCG2022060004)；新疆交通设计院科技研发项目(KY2022021501)

作者简介：张天意(1997-)，男，硕士研究生，主要从事公路冰雪灾害防治. E-mail: zhangtianyiKevin@outlook.com

通讯作者：刘杰. E-mail: hfutliujie@163.com

析矿山地质灾害的类型、规模、损失及危害等。彭大雷等[11]在利用无人机低空摄影技术中发现其能很好地认识灾害空间分布规律和发育特征，且能清楚认识灾害变形迹象和成灾过程。Eirik等[12]将无人机航拍获取的雪崩运动轨迹正射影像作为验证数据，在一定程度上提高了评估高分辨率的SAR用于探测雪崩运动的准确度。Yang等[13]将无人机作为技术手段发现航拍数据能够更好的识别雪崩形态特征。Markus等[14]学者利用无人机进行了雪崩空中调查，根据获取的雪崩碎片正射照片，提取到了有关流动特征和流态的信息，并生成雪崩表面DEM数据；该数据能够更有效的运用于雪崩动力学建模和雪深空间变异性研究。相较于传统人工实地调查方式，上述非接触式获取灾害信息的技术在精度、效率、安全性等方面都有着明显的优势，可为保障人民生命财产安全和灾害应急响应等工作提供更充分的科学依据。

在雪崩运动过程模拟领域，由于雪崩的突发性及运动过程复杂，现有的模拟模型大多基于一些经验模型及简化的物理模型[15]。此类模型主要针对运动过程中的特征值进行计算。而瑞士联邦冰雪与雪崩研究所在Voellmy[16]和Salm等[17]所提出的Voellmy-Salm（简称VS）模型的理论基础上研发了二维雪崩动态数值模型——Rapid Mass Movement Simulation（简称RAMMS）。该模型考虑雪崩运动过程中流动高度和速度变化的非定值和非均匀运动特征，使用积雪深度平均方程同时耦合随机动能（Random Kinetic Energy，RKE）模型来考虑质量和动能守恒，解释了雪粒之间的随机运动和非弹性互相作用，从而能够更好的模拟运动过程中各特征参数的动态变化趋势。因此，为了提高模型计算结果的准确性，输入参数将更依赖于高精度的地理信息数据。随着3S技术的迅猛发展，传统的数据获取方法存在采集率低、生产成本高、建模周期长、精度低等问题，不能满足雪崩重建需要[18]。而利用无人机进行数据采集、实景建模等技术日趋成熟，其中，无人机倾斜摄影技术可通过多镜头的倾斜相机采用定点曝光获取地面多角度纹理影像[19]，再通过处理生成实景三维模型，在此基础上生成的数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）及数字正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM）精度高、成像清晰，是雪崩运动过程模拟中可靠的数据源[20]。

综上所述，本文将无人机倾斜摄影技术应用于新疆西天山阿尔先沟雪崩调查研究工作中，利用航拍数据精细探测雪崩活动过程、识别雪崩流动特征及流态信息，生成高精度DEM数据；再结合现场实测值，确定RAMMS模型输入参数，进行雪崩运动过程模拟。通过对不同类型雪崩事件的模拟和重建，对比分析传统地面调查、无人机遥感解译结果与模拟结果的差异，探讨不同类型、不同雪层释放条件下雪崩活动过程，可为今后雪崩潜在危险预测、风险规避及灾害应急处置提供强有力的数据支撑及科学依据。

1 研究区概况

天山山脉呈准东西走向，地形构造特殊，受西风带气流影响，在西天山伊犁河谷及两侧山区易形成丰富降水区；因典型的褶皱断块山，使得古冰斗、雪蚀洼地散见，其内可聚集大量积雪，因而成为雪崩的多发地[21-22]。而阿尔先沟正处于西天山深处，属中高海拔的山地地貌，是沿纬向构造山脉发育的山间盆地和谷地，沟谷两侧山体地形起伏较大，山势陡峭，斜坡坡度一般40°~60°，地面高程2000~3500 m；河谷东南侧林间少有雪崩痕迹，而西北侧山地裸露，植被覆盖率低，属于典型的雪崩灾害孕灾环境。2023年冬春季，对阿尔先沟进行雪崩调查发现，该段在14 km的主要雪崩区内，发育雪崩近百处，且发生频繁而集中。阿尔先沟区位及沟内实况如图1所示。

雪情很大程度上决定着雪崩触发及其破坏力的大小[4,23]。通过建设DZZ4型区域自动气象站监测阿尔先沟2022—2023年冬春季雪情变化情况，对于气温、风向等变率较大的观测指标，采用1 s一次的采样方法，风速采用0.25 s一次的采样方法；积雪深度、固态降水等采用一分钟一次的采样方法。气象站具体位置及情况如图1所示。2022—2023年阿尔先沟冬季积雪深厚，且持续时间长，降雪期从9月—次年4月结束，而11月开始平均气温低于0 ℃，地表开始积雪，地表平均积雪深度最深可达91 cm；11月—次年4月，气温存在明显的回升情况，同时河谷内出现盛行风，且在4月出现积雪期内平均风速的峰值点，达到2.87 $m\cdot s^{-1}$，其最大风速可达12 $m\cdot s^{-1}$（图2）。由于风速的变化使风吹雪形成的雪层在密度和硬度上都呈现很大的变化，雪层中的应力在局部

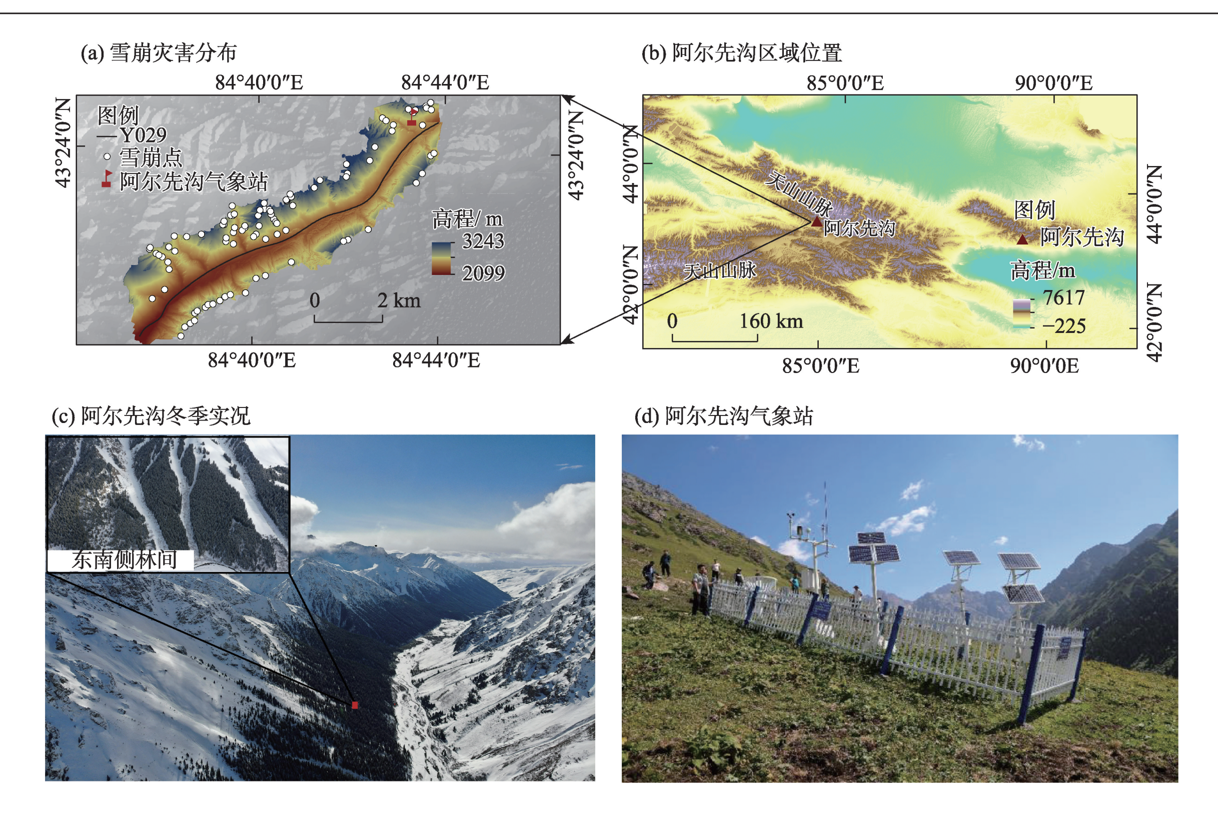


图1　阿尔先沟地理位置及实况图

Fig. 1　Location of Aerxiangou and the actual map

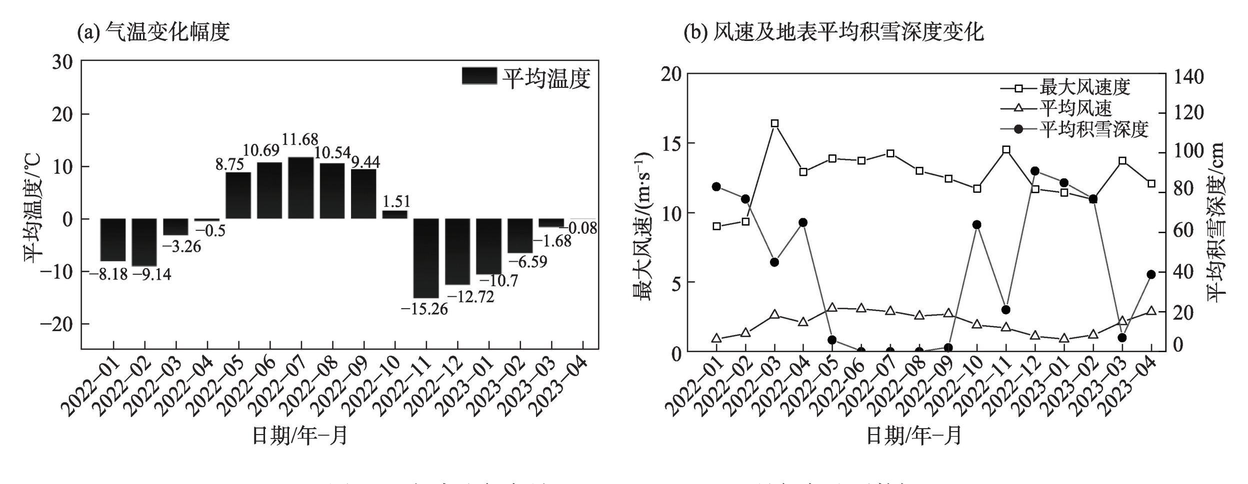


图2　阿尔先沟气象站2022-01—2023-04月气象监测数据

Fig. 2　Meteorological monitoring data between 2022-01 and 2023-04 at Aerxiangou meteorological station

聚集，从而增加雪层的不稳定[24-25]。同时一次降雪过程中新降雪密度的增加（即高密度降雪位于低密度雪层之上），导致雪层不稳定性增大，在风力和降雪等外力作用下，研究区雪崩爆发概率增大[26]。

2　数据处理与方法

2.1　空-地协同调查

利用人工地面调查方法实地踏勘雪崩灾害现场，获取堆积区范围、形态及积雪特征等实测数据。联合以无人机航拍为核心的雪崩无人机空中调查技术获取高精度航拍数据，结合航拍数据建立三维模型，对调查区域内的雪崩灾害点和隐患点进行系统性全面分析，判断雪崩类型，识别雪崩释放区、运动区及堆积区，查明灾害空间分布状态及数量。在此基础上进行雪崩过程数值模拟，对比分析堆积体与野外观测范围，以评价模拟结果的准确

性；通过三维模型解译、数值模拟结果与现场调查数据相互验证，完善灾害点基本属性信息，构建雪崩灾害数据库，为灾害防治提供依据。具体雪崩灾害空-地协同调查流程如图3所示。

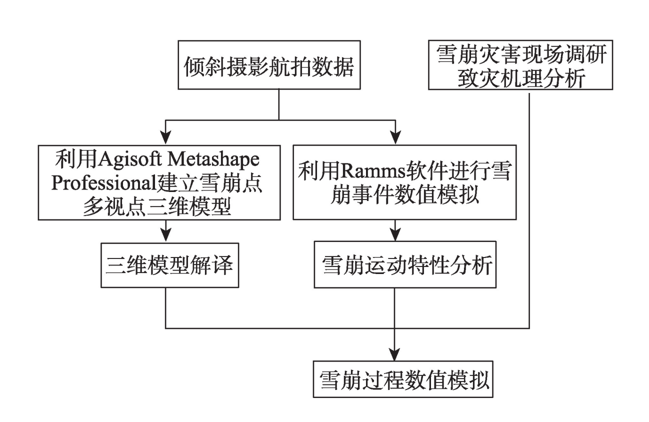


图3 空-地协同调查流程图

Fig. 3 Air-to-ground cooperative investigation flow chart

2.1.1 地面调查 在传统地面调查过程中对调查区域按照雪崩类型进行分区判断。最终确定重点调查区域、一般调查区域、非调查区域。重点调查区域是指该区域满足雪崩灾害诱发条件且对公路、重要构造物等产生较大影响。非调查区域是指该区域内雪崩灾害不会对公路、重要构造物等产生影响。一般调查区域则是指雪崩灾害诱发条件较差，可能对公路、重要构造物等产生较小影响(图4)。

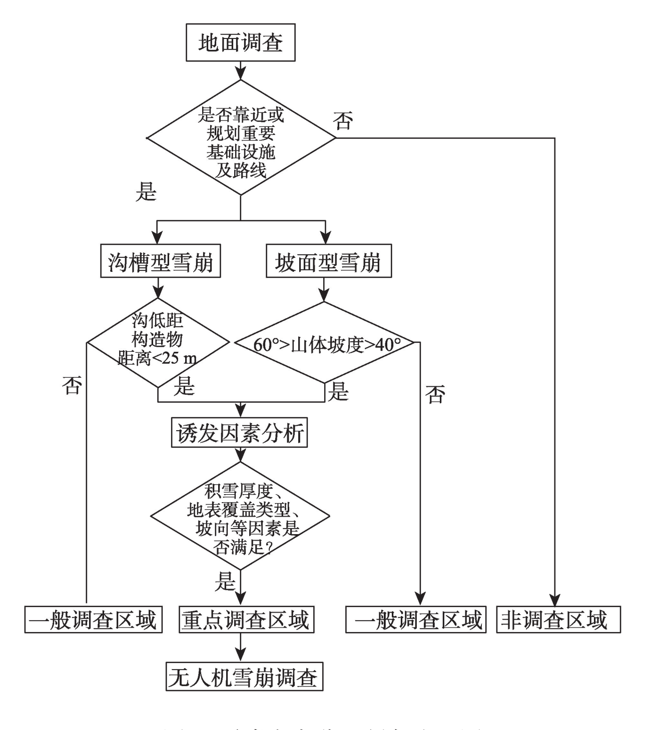


图4 雪崩灾害分区判断流程图

Fig. 4 Avalanche disaster zoning judgment flowchart

针对重点调查区域进行现场测量获取雪崩灾害实测数据并采用无人机雪崩调查技术进一步解译雪崩灾害。

2.1.2 无人机空中调查及数据获取 根据地面调查分区结果，在重点调查区域开展无人机雪崩调查。前期准备工作包括收集气象数据、定点勘察和划定飞行区域；在此基础上规划航线，设置相关飞行参数。为保证测区完整性设置了10%~30%的缓冲区，同时为确保无人机航拍能够尽可能多的覆盖测区范围，根据测区及缓冲区大小设置45°的最佳倾斜摄影角度。通过提高相片重叠度及拍摄间隔方式以保证测区范围内各处至少有三幅不同位置的重叠影像保证了模型细节的清晰以及数据的精确性[27-28]。结合无人机倾斜摄影三维重建技术从一个垂直，多个倾斜视角出发，获取不同地表地物顶部信息，以及立面详细的轮廓和纹理信息[18-19,29-30]，识别雪崩释放区、运动区及堆积区，查明雪崩空间分布状态。在三维重建过程中可对航拍数据进行预处理以解决图像失真、变形等问题；处理方式包括利用相机畸变参数对图像畸形矫正以及考虑到航拍过程中由于天气原因造成的曝光或色彩不均问题进行的羽化及重曝光处理[28]。经过预处理后的航拍数据导入多视点三维建模软件获取密集点云数据，生成三维模型，导出DEM、DOM[13]。基于模型成果进行无人机目视遥感解译，分析雪崩空间地理属性。无人机雪崩灾害调查技术流程如图5。

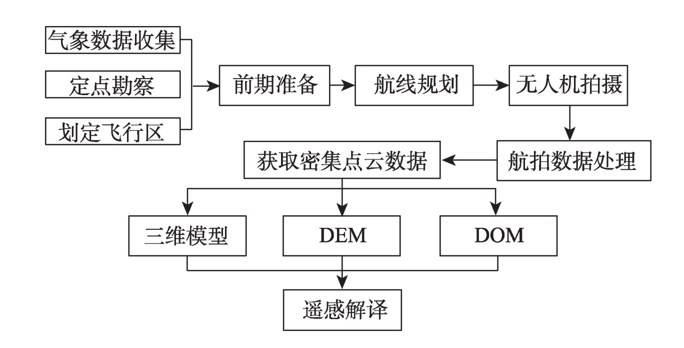


图5 无人机雪崩调查技术流程图

Fig. 5 Flow chart of UAV avalanche survey technique

2.2 RAMMS雪崩过程模拟原理及输入数据获取

2.2.1 RAMMS模型模拟原理分析 采用RAMMS模型，模拟复杂地形中雪崩的流动过程，其本质是在VS模型基础上考虑雪崩运动过程中流动高度和速度变化的非定值和非均匀运动特征，使用积雪深度平

均方程同时耦合RKE模型来考虑质量和动能守恒，解释雪粒之间的随机运动和非弹性互相作用[31-32]。

模型基于笛卡尔坐标系来表征平均速度U,假设X和Y为固定于笛卡尔坐标系中的水平坐标,$Z(x,y)$表示用X和Y参数化的山脉轮廓,自变量X、Y表示地形弧长,坐标X、Y、Z形成了曲面诱导坐标系。随着时间t的变化雪崩流动高度$H(x,y,t)$(m)和平均速度$U(x,y,t)$($\mathrm{m\cdot s^{-1}}$)也随之变化,平均速度$U(x,y,t)$关系式如下：

$$U(x,y,t)=\left[U_x(x,y,t)(x,y,t)^T\right] \quad (1)$$

$$n_u=\frac{1}{u}\left[U_x(x,y,t),U_y(x,y,t)\right]^T \quad (2)$$

式中:U_x为X轴的流速值;U_y为Y轴的流速值;T为平均流速矩阵的转置;n_u表示雪崩运动的方向。

由于雪崩呈现浅层流体几何形态,用质量平衡方程来求解雪崩流动高度H,如下式：

$$\partial_t+\partial_x\left(HU_y\right)+\partial_y\left(HU_y\right)=Q(x,y,t) \quad (3)$$

VS模型中将摩擦系数考虑为两部分,与法向应力N成正比的干库伦摩擦系数μ和湍流摩擦系数ξ。摩擦阻力S(Pa)公式如下：

$$S=\mu N+\frac{\rho g u^2}{\xi},N=\rho h g\cos\phi \quad (4)$$

式中:ρ表示密度;g为重力加速度;ϕ为斜角;h为流动高度;u为矢量$u=\left(u_x,u_y\right)^T$;摩擦系数对碎屑流运动演变过程有直接影响。当流动接近于停止时,μ起主导作用;当流速快速运动时,ξ主导作用。

考虑到雪崩运动体是由雪团组组合,运动过程中可能携带粒状碎屑等物质,运动过程中平行或者非平行斜坡方向时会出现速度上的波动,采用RKE模型实时修整,可更好的表现雪崩实时运动特征的变化。如公式(5)和公式(6)所示：

$$\mu(R)=\mu\exp\left(-\frac{R}{R_0}\right) \quad (5)$$

$$\xi(R)=\xi\exp\left(-\frac{R}{R_0}\right) \quad (6)$$

式中:R_0为平均随机动能密度函数的摩擦指数增长率,为常数;R为深度平均随机动能。修正后的干库伦摩擦系数μ和湍流摩擦系数ξ取决于R。

2.2.2　*雪层断裂深度的确定*　断裂深度是指雪崩释放区内,一定厚度的雪层在重力、温度等因素作用下,积雪薄弱层失效出现垂直于坡面的裂缝后,沿着裂缝向下滑动的平均积雪厚度。根据山坡积雪体的平衡条件,山坡上积雪所受重力可分解为平行于山坡的应力和垂直于山坡的正压力,而下雪层在重力的作用下有沿坡面向下滑动的趋势,当雪层的下滑力大于阻力时引发雪崩。由此得出山坡坡面积雪临界厚度,如公式(7)所示。当坡面积雪厚度到达临界厚度值时,雪层的下滑力与阻力处于平衡状态,这时如果积雪厚度的增大或者雪层应力分布不均,都会导致雪层沉降,引起滑塌。因此,本研究引用临界厚度来确定雪层断裂深度。

$$h_k=\frac{c}{\tau(\sin\alpha-\cos\alpha\times\mathrm{tg}\,\phi)} \quad (7)$$

式中:h_k为山坡积雪厚度;c为雪与坡面间的内聚力;ϕ为雪与地面的内摩擦角(°);τ为积雪的密度($\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$);α为山坡坡度(°)。

由于公式(7)中的变量均与积雪、坡面特性相关;结合研究区现场实际情况与胡汝骥等[33-35]对天山山区季节性积雪物理性质研究过程中得出的不同类型积雪物理力学强度分析结果,确定公式(7)中数值取值(表1),其中山坡坡度根据地形分析得出。

2.2.3　*摩擦系数的确定*　RAMMS对摩擦系数(μ、ξ)有两种设置情况,常量和变量计算模式。常量计算模式考虑雪崩区域下垫面处于相同性质的地表状况,整个雪崩运动区域(释放区、运动区、堆积区)用固定的μ和ξ值,摩擦系数(μ、ξ)的取值取决于重现期以及雪崩体积。而变量计算模式,μ和ξ值不固定,考虑不同海拔区域地表状况不同,使用不同的μ和ξ值。根据研究区内雪崩特征并结合模型参数建议值进行匹配以适用于研究区域。

2.2.4　*数字高程模型*　DEM作为RAMMS数值模拟中最基本的输入数据,能够准确反映雪崩模拟区域的地形特征,而其分辨率的高低对于模拟效果存在较大影响[36-37]。Christen[38]分别采用2.5 m、25 m计算

表1　积雪物理性质

Tab. 1　Physical properties of snow

雪型	内聚力/($\mathrm{g\cdot cm^{-2}}$)	内摩擦系数	密度/($\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$)	抗断强度/($\mathrm{g\cdot cm^{-2}}$)
新雪	5	0.22	0.15(实测)	2.8

网格分辨率进行模拟,结果显示不同计算网格分辨率下雪崩流中心堆积存在分布差异。同时Buhler等[39]提出25 m的空间分辨率足够准确的模拟大规模雪崩,较2 m DEM的模拟结果具有较高的吻合度。本研究在考虑区域面积、计算时间与雪崩规模的基础上,为了保证模拟结果的准确性将采用无人机倾斜摄影航拍数据获取的2.0 m的DEM作为输入数据,进行雪崩过程模拟。

2.3 三维计算模型建立

依据无人机倾斜摄影技术获取的高精度DEM,通过ArcMap完成地形表面分析自动识别坡度适合区、划定雪崩释放区域以及森林、基础设施等位置[40],具体程序如下:(1)创建地图,导入DEM创建2D环境模型。(2)执行“创建Shapefile”,要素类型为“面”,坐标系统一为WGS_1984,根据自动识别坡度结果划定雪崩释放区域,并叠加DOM;由于RAMMS对于摩擦系数的设定分为常量和变量计算模式,如果使用恒定摩擦值进行计算则不考虑地形起伏和森林区域,而使用变量摩擦值则需要根据地形数据对摩擦值进行分类设置。因此,需对森林、基础设施等区域进行划分以便于摩擦值分类设置。(3)将处理后的DEM、DOM、Shapefile文件导入雪崩动力学数值模拟软件—RAMMS中,再根据前期现场调查和实测数据确定模拟软件输入参数值。最后输出雪崩三维计算模型。

3 阿尔先沟雪崩调查及过程模拟

3.1 雪崩信息提取

2023年2月11—18日,调查发现A、B、C三处雪崩,根据现场信息提取,雪崩发生于东北-西南向Y029公路的北侧陡峭山体,岩石裸露,表面积雪滑动痕迹明显。雪崩从坡面陡峭处释放,冲出公路,制动区位于公路南侧硬路肩外。对A、B、C三处雪崩堆积区进行分析发现(图6),A处雪崩堆积体剖面结构中雪崩碎片粒径较小且以粉状为主,剖面积雪结构较均匀。山坡坡面有风吹雪痕迹。经现场测量,A处雪崩堆积区抛出距离约占公路2 m,堆积体约为42.83 m^3,高度约为1.7 m。从现场情况看雪崩释放区可能位于位置较低且面积较小的局部坡面,雪崩流在坡度小于25°的位置停止释放(图6b)。初步调查判断该区域是由于坡面积雪厚度达到临界值,降雪及风力等耦合作用下产生的新雪雪崩。

分析B处雪崩堆积区后发现,在均匀积雪结构堆积体的上方有少量颗粒较小的雪崩碎片;由于温度上升,雪层融化坡面呈现出鱼磷状雪层(图6c)。依据王建等[41]提出的中国积雪特性现场测量方法进行积雪特性测量中发现,坡面表层颗粒雪密度达到434 $g\cdot cm^{-3}$,表层温度1.9 ℃。而雪崩堆积区中雪层温度呈现出逐步增大的趋势,地表面积雪层100 cm和0 cm处温度分别为-0.1 ℃、0 ℃。雪层密度随着温度的增大不断增大,100 cm、0 cm处雪层密度分别为263 $g\cdot cm^{-3}$、385 $g\cdot cm^{-3}$(表2,图6c)。根据堆积体积雪密度的变化以及地面调查情况分析,B处堆积区是在第一次新雪雪崩后形成的堆积形态基础上,受到温度升高坡面上方积雪融化后,由近期再次出现的小规模湿雪雪崩形成的堆积体。

与A、B处雪崩不同,C处属于连续性雪崩点,堆积区长度达150 m左右,形态呈锥型(图6d)。堆积区截面最大雪深1.8 m,平均雪深1.7 m,抛出距离最远约占公路8 m宽。根据现场情况分析,山体下方存在断面,断面上设置防护网;山体上方存在类似沟体的结构。就积雪密度而言C处较A、B处小,雪体松散,未出现冰体,堆积体以粉状雪为主,结构较均匀,属新雪雪崩。

3.2 模型构建及灾害解译

3.2.1 *影像获取* 本次调查采用大疆经纬M300 RTK无人机,搭载禅思H20摄像头,测绘区域面积 8.9256×10^4 m^2航线时长约为32 min,飞行参数如表3所示。本次飞行任务共5条航线(图7),获得58张倾斜摄影图像。由于高处、低处分辨率不同,其影像地面分辨率为0.05~0.10 m。

3.2.2 *数据处理及灾害解译* 采用Agisoft Metashape Professional对航拍数据进行处理,生成三维实景模型,处理步骤包括对齐照片、建立密集点云、生成网格、生成纹理;根据密集点云数据生成正射影图像,在正射影图像基础上进行三维实景模型建立(图8)。

结合地面调查情况以及地形判断,A、B处属于坡面型雪崩,该坡面上方存在两个天然的积雪平台,汇雪面积在 0.58239×10^4~1.3108×10^4 m^2。坡面呈现出上陡下缓的形状,上半部分陡坡处坡度达50°以上,坡面积雪量少,地表裸露,坡面积雪主要集中在下半部分缓坡处,坡度在30°~45°;积雪平台至

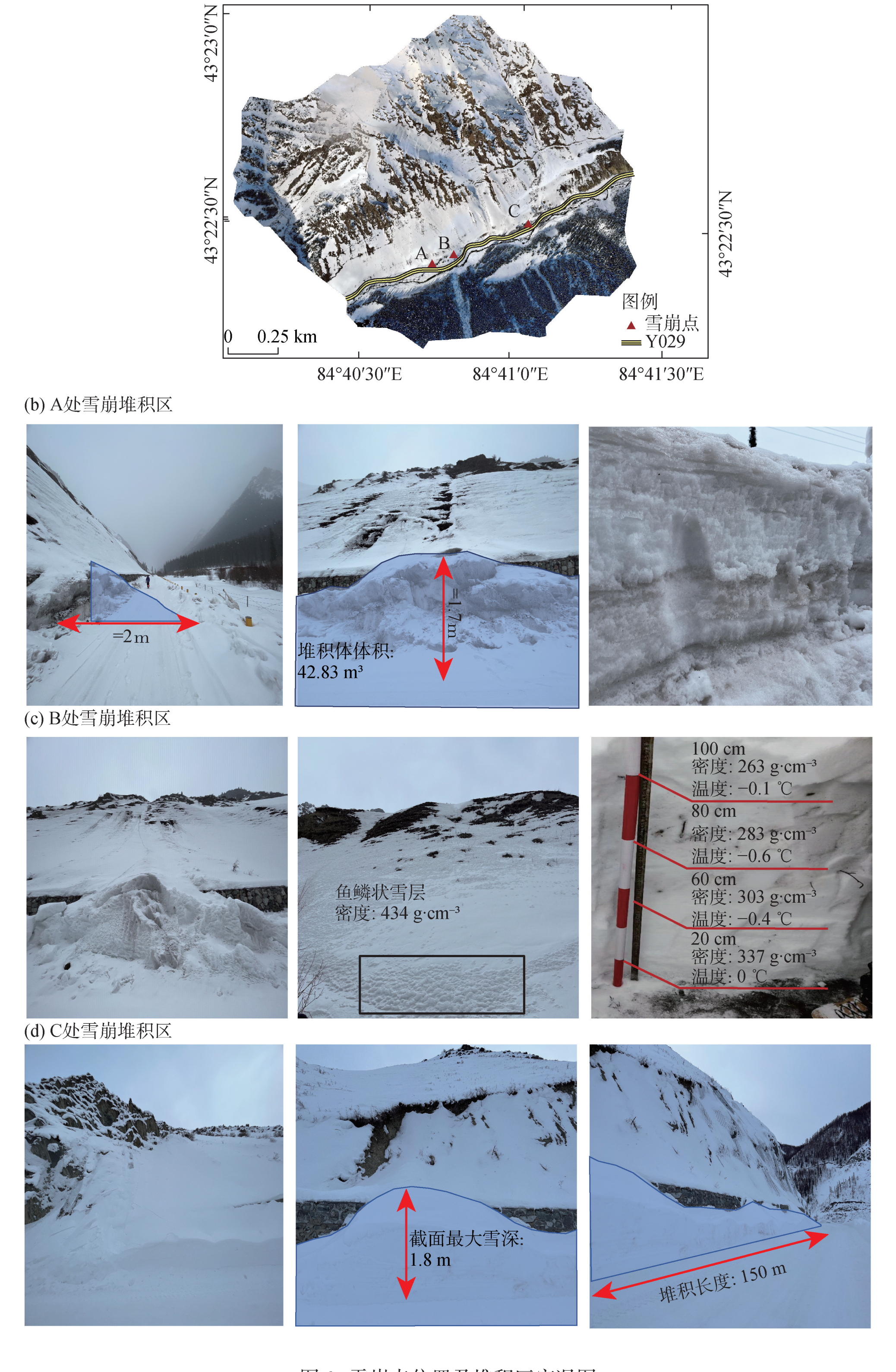


图6 雪崩点位置及堆积区实况图

Fig. 6 Actual map of avalanche point location and accumulation area

坡底最短距离在510 m，最长距离为594 m（图8）。

造成坡面型雪崩发生的主要原因：（1）缓坡坡面积雪达到临界厚度出现雪层失稳，雪崩影响范围较广，堆积区积雪量较大，但整体冲击力、流动速度较弱。（2）上方积雪平台雪层失稳，积雪释放量较大，两个积雪平台共用同一个运动区，易造成两个

表2 堆积区积雪特性

Tab. 2 Snow cover characteristics in accumulation area

	雪层厚度/cm						
	100	80	60	40	20	10	0
雪层温度/℃	−0.1	−0.6	−0.4	−0.1	−0.1	0	0
雪层密度/(g·cm⁻³)	263	283	303	314	337	360	385

表3 无人机倾斜摄影飞行参数

Tab. 3 UAV tilt photography flight parameters

项目	参数	项目	参数
模式	倾斜摄影	拍照模式	等距间隔拍照
航线/条	5	旁向重叠率/%	75
倾斜角度/(°)	45	航线重叠率/%	80
飞行高度/m	1000	旁向重叠率(倾斜)/%	70
边距/m	20	航线重叠率(倾斜)/%	70

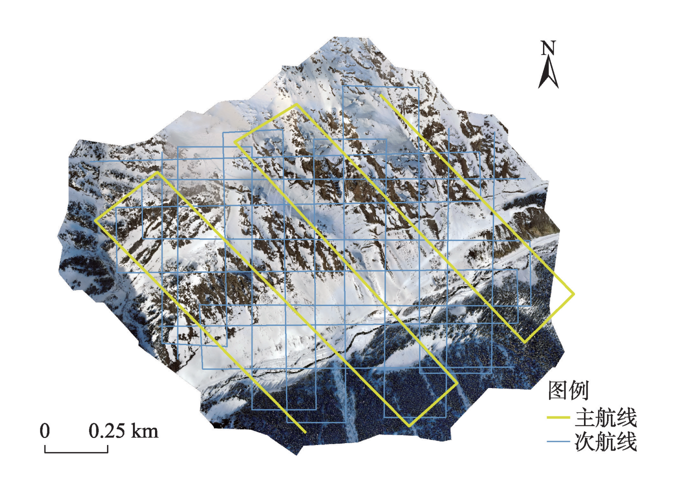


图7 研究区域航线图

Fig.7 Study the regional route chart

积雪区同时释放,雪崩流具有交汇点。考虑积雪夹带作用,易引起缓坡坡面积雪的失稳。危险性较大,影响范围较广。

结合地面调查情况以及地形判断,C处堆积区属于沟槽—坡面复合型雪崩,上部释放区为沟槽发育,上宽下窄,最宽处大于300 m,最窄处不足50 m。汇雪面多,积雪量大,整体汇雪面积可达38124.0 m^2,释放区至坡低直线距离近700 m,落差较大。经测量汇雪区山体坡度在26°~35°,具有较好的储雪条件。雪崩的发生主要由于沟槽型山体左右两侧坡面积雪失稳汇集于沟槽内,上宽的沟体使得汇雪量大,下窄使得雪崩冲出后到达坡面呈发散状向左右两侧运动(图8,图9)。

根据航拍数据解译出该区域山体存在雪檐和雪层裂缝。利用无人机Real Time Kinematic(RTK)空中测量技术发现坡面型雪崩中以两条雪檐规模最大,长度在80~150 m,沿着山脊发育形成,呈南北走向。雪檐旁伴随雪层裂缝发育,裂缝较长,两条裂缝长约155.41 m、144 m,裂缝周围有较明显的滑动痕迹。下半部分坡面处出现竖直向下的裂缝,裂

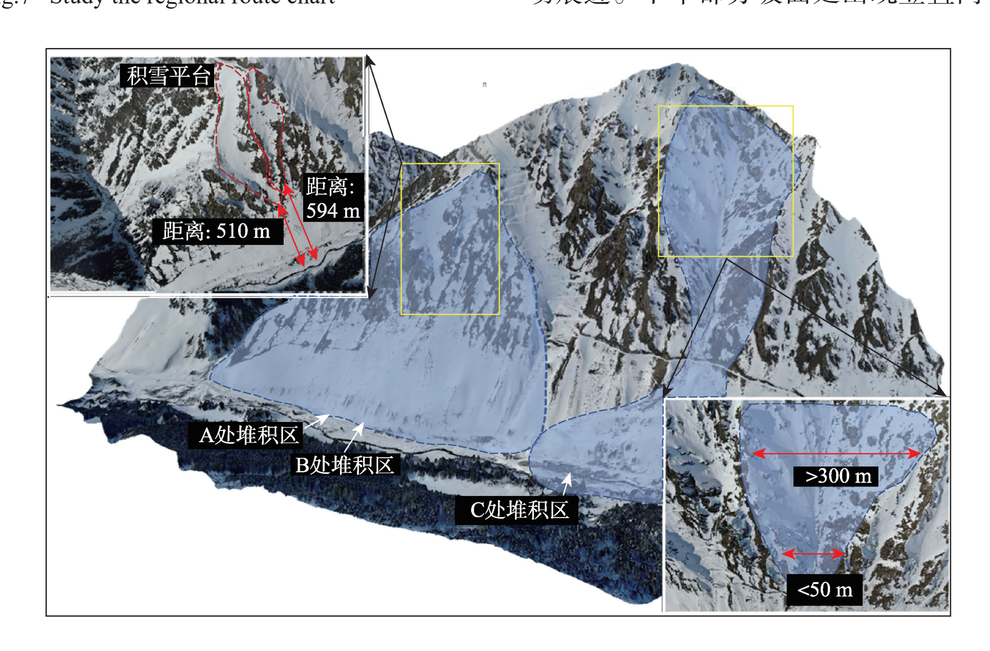


图8 三维实景模型

Fig. 8 3D real life model

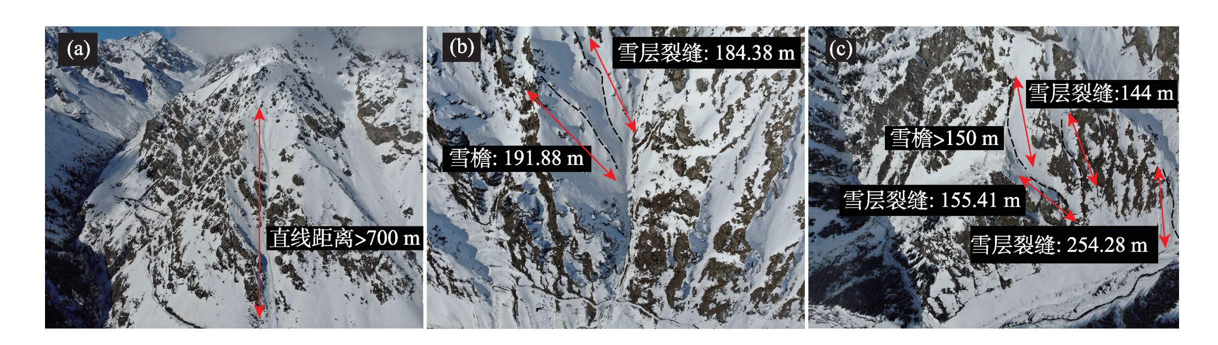


图9　雪崩解译结果

Fig. 9　Disaster interpretation results

缝较长，达到254.28 m，延伸至坡底(图9c)。对沟槽—坡面复合型雪崩的灾害解译过程中发现该雪崩汇雪区出现多个雪檐，规模最大的长度为191.88 m，呈东西—南北走向，雪层裂缝与雪檐平行发育，长度达184.38 m。释放区域可见多条裂缝以及雪崩滑动痕迹(图9)。

结合解译结果与地面调查综合分析，目前研究区内仍处于灾害发育阶段，如果持续降雪后温度持续上升，雪檐、裂缝具有加剧变形的趋势，将会出现湿雪型雪板雪崩。雪层中含水量较高，导致崩出距离大，从而对环境和基础设施更具威胁。其次，还易在崩落过程中裹挟土壤，造成土壤流失[1,42]。

3.3　雪崩过程模拟及分析

将无人机航摄数据处理生成的DEM通过ArcMap完成前期工作后，结合地面调查以及无人机航拍数据，确定模型输入参数，再导入RAMMS对区域内坡面型、沟槽—坡面复合型雪崩进行模型计算，分析灾害活动特征。本文考虑最大危险性，即雪崩量最大的情况(山坡积雪全层断裂)，认为临界厚度等于断裂深度。

坡面型：
$$h_k=\frac{C}{\tau(\sin\alpha-\cos\alpha\times \mathrm{tg}\,\phi)}=\frac{5}{0.15(\sin 45°-\cos 45°\times 0.22)}\approx 0.6\ \mathrm{m} \tag{8}$$

沟槽—坡面型：
$$h_k=\frac{C}{\tau(\sin\alpha-\cos\alpha\times \mathrm{tg}\,\phi)}=\frac{5}{0.15(\sin 35°-\cos 35°\times 0.22)}\approx 0.84\ \mathrm{m} \tag{9}$$

考虑到本文研究的坡面型雪崩属于非沟渠地形，且雪崩运动区域(释放区、运动区、堆积区)的下垫面(剥蚀构造山区)一致，摩擦系数采用常量计算模式，而沟槽—坡面型雪崩流经过区域为沟渠、沟谷、山谷平坦地区，摩擦系数则采用变量计算模式。因此本次雪崩模拟所需的摩擦系数需要结合地形特性和模型参考值进行分类选择。具体摩擦系数参考值如表4所示。

表4　摩擦系数μ和ξ在不同地形、不同海拔高度取值

Tab. 4　The values of friction coefficients μ and ξ for different terrain and altitudes

地形条件	海拔/m	μ	ξ
非沟渠型地形	＞3000	0.29	1500
	3000~2700	0.305	1400
	＜2700	0.33	1250
沟渠型地形	＞3000	0.34	1250
	3000~2700	0.355	1180
	＜2700	0.37	1050
沟谷地形	＞3000	0.45	1050
	3000~2700	0.46	1100
	＜2700	0.47	900
平坦地形	＞3000	0.275	1750
	3000~2700	0.285	1600
	＜2700	0.295	1500

3.3.1　坡面型雪崩模拟结果及分析　根据模拟结果显示，以坡面上方积雪平台为释放区，雪崩释放体积可达$8.2669\times10^4\ \mathrm{m}^3$。雪崩运动方向主要沿坡面运动，雪崩流较集中，支流少。堆积区分布集中，影响范围较集中。两个积雪平台共用同一个运动区，相互影响下连续性释放，雪崩流具有交汇点，与前文三维实景模型解译结果相同。但产生的堆积区分布集中，且连续，与地面调查过程中发现的分散的堆积区布局不同。进而判断近期坡面型雪崩并非积雪平台的释放。

以积雪平台为潜在释放区考虑雪崩量最大时(雪层全层断裂),雪崩流运动时长仅为128 s,并且40 s内雪崩流已到达公路,制动区位于公路南侧硬路肩外。依据地形分布堆积体呈现出中间高、四周低的椎状体。由图10可知,堆积区约在120 s内流动高度达到最大,约为3.55 m;而最大流动速度在18.34 m·s^{-1},冲击力最大在32.67 kPa;积雪堆积量约为1.8525×10^4 m^3,影响面积在3369.7 m^{2}左右。说明该情况下雪崩影响范围广,堆积体面积较大,冲击力及运动速度足以对环境和基础设施等承载体产生较大威胁。

3.3.2 沟槽—坡面复合型雪崩模拟结果及分析 考虑雪崩量最大的情况(雪层全层断裂)进行模拟,沟槽—坡面复合型雪崩体从海拔2988 m处启动,释放体积可达7.6071×10^4 m^3,从坡面崩塌而下,沿着上宽下窄且深的沟体流出后顺着坡面呈扇形状流出,大约在75 s后开始堆积在海拔约2229 m平坦区,256 s后停止堆积,形成面积为1369.7 m^2,体积约11717 m^{3}的堆积体。堆积体最大堆积高度位于河谷内,可达3.8 m,平均堆积深度约为2.5 m,流动速度最大值为13.6 m·s^{-1},冲击力最大值为30.72 kPa。由于沟体深而窄,运动区域小,大部分积雪遗留在沟谷中,最大堆积深度达到18.91 m,是堆积区最大深度的两倍多。并且该雪崩运动过程中各运动特征高值均位于沟谷中,最大速度32.06 m·s^{-1},最大冲击力154.19 kPa(图11a~图11c)。

沿着Y029公路获取堆积体横截面,根据横截面堆积高度反应出堆积体形态,受坡面形态影响形成中间高、四周低的连续性椎状堆积体,与前文地面调查堆积形态和航摄成果解译结果一致(图11j)。但雪层全层断裂下堆积区平均堆积高度是现场测量的堆积区平均截面深度1.71 m的近1.5倍。与实际调查堆积情况不符。其原因与释放量有关,雪崩模拟过程中堆积区雪量受到摩擦系数和释放量的控制,在下垫面处于相同性质的地表状况下,摩擦系数相同,而不同的释放量对雪崩运动的冲出范围

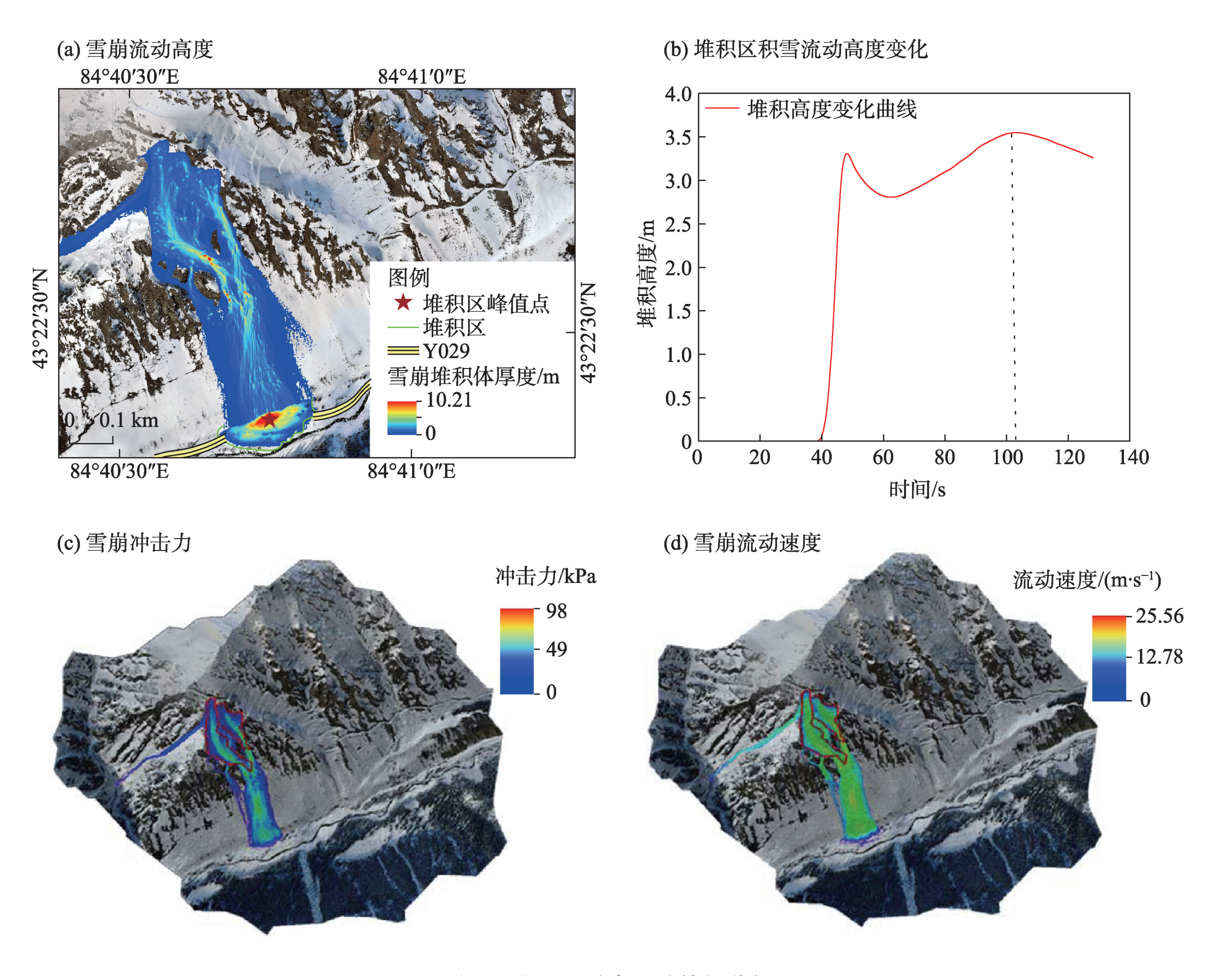


图10 坡面型雪崩运动特征分析

Fig. 10 Analysis of slope avalanche movement characteristics

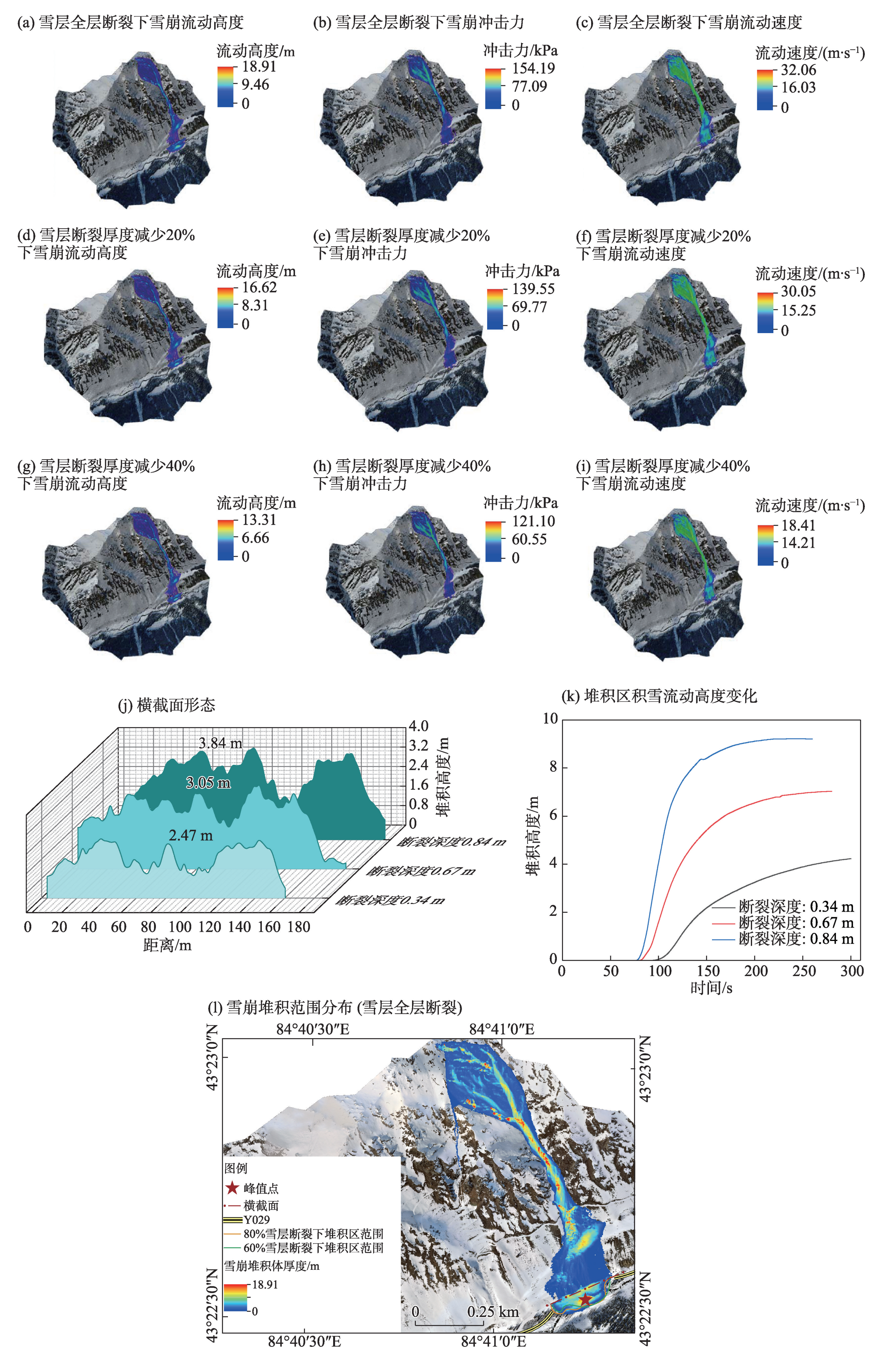


图11　沟槽—坡面复合型雪崩运动特征分析

Fig. 11　Characterisation of trench-slope composite avalanche kinematic signature map

及堆积量产生较大影响。

为了使得堆积区模拟结果更符合地面调查情况，利用单因素分析方法进行不同断裂深度下雪崩数值模拟，将断裂深度分别减少20%、40%，所得的断裂深度分别为0.67 m、0.34 m。从模拟结果表5可以看出，当雪层断裂深度减少20%，雪崩流积区影响范围为1299.5 m^2，平均堆积深度为2.27 m，冲出量为4578.22 m^3，堆积区最大流动速度为10.24 $m\cdot s^{-1}$，最大冲击力为21.42 kPa；当雪层断裂深度减少40%，雪崩堆积区影响范围在1178.5 m^2左右，平均堆积深度为1.64 m，冲出量为3107.76 m^3，最大流动速度为6.58 $m\cdot s^{-1}$，最大堆积区冲击力为17.97 kPa。由于三次模拟在雪崩释放量上存在很大的差异，相比于雪层全层断裂，断裂深度减少40%雪崩流到达堆积区时间较晚，但持续时间最长，接近于300 s，而断裂深度减少20%雪崩流在80 s后流到堆积区，持续时间在275 s左右，持续时间均大于雪层全层断裂；堆积区积雪厚度最大值则因持续时间的增长形成较晚（图11k，表5），其原因主要与雪崩流自重相关。

表5 不同断裂深度下模拟结果统计

Tab. 5 Statistics of simulation results at different fracture depths

	不同断裂深度/m		
	0.84	0.67	0.34
运动时长/s	256	275	298
堆积量/m^3	11717	4578.22	3107.76
堆积面积/m^2	1369.7	1299.5	1178.5
堆积区最大流动高度/m	9.22	7.03	4.23
最大堆积高度/m	3.8	3.05	2.47
平均堆积深度/m	2.5	2.27	1.64
堆积区最大流动速度/($m\cdot s^{-1}$)	13.6	10.24	6.58
堆积区最大冲击力/kPa	30.72	21.42	17.97

由以上结果可知，沟槽—坡面复合型雪崩由于地形因素影响，堆积区分布状况主要受下部坡面控制，在对运动特征进行分析中发现，断裂深度减小，导致释放量减少，堆积量、最大堆积高度、最大堆积区流动速度、最大堆积区冲击力随之减小，而堆积区面积整体变化幅度较小。观测值与模拟结果对比发现，断裂深度减少40%，平均堆积深度在1.64 m左右，与现场堆积体测量结果相近，堆积区最大流动速度达到了6.58 $m\cdot s^{-1}$，堆积区最大冲击力在17.97 kPa左右，最大运动特征值足以对承载体产生破坏性损伤，严重情况下可威胁生命财产安全。

4 结 论

本文基于空-地协同调查方案对雪崩过程进行数值模拟并对运动特征进行分析，得出以下结论：

（1）以无人机倾斜摄影为核心的雪崩灾害空中、地面协同调查，将传统的地面调查方法结合无人机遥感解译和数值模拟结果相互验证，提高了对于雪崩灾害发育状况评价的准确性，弥补了过多于依赖经验值判断的主观性。

（2）2月中旬，西天山阿尔先沟为持续降雪条件下坡面积雪厚度趋近于临界厚度值，雪层失稳出现的新雪雪崩。调查时研究区内雪崩已发生且仍处于灾害孕育阶段，雪层裂缝有加剧变形趋势，风力作用下雪檐自重增大，有超过雪的抗断强度的趋势，整体稳定性差，在降雪、风等外力作用下具有发生大规模雪崩的可能性。

（3）以坡面上方积雪平台为潜在释放区的坡面型雪崩，释放量可达8.2669×10^4 m^3，运动时长约为128 s，并在120 s内堆积区流动高度达到最大，约为3.55 m，流动速度最快可达18.34 $m\cdot s^{-1}$，冲击力达到32.67 kPa。而堆积量达到1.8525×10^4 m^3，影响面积在3369.7 m^2。通过相互验证，坡面型雪崩并非积雪平台的释放，地面调查结果与数值模拟结果存在差异。

（4）沟槽—坡面复合型雪崩在不同断裂深度下进行模拟，其堆积体形态受坡面影响均形成中间高、四周低的连续性椎状堆积体，与现场地面调查和航摄解译堆积形态结果一致；而在雪层断裂深度减少40%，平均堆积深度与现场堆积体测量结果相近；因此，沟槽—坡面复合型雪崩为沟槽坡面雪层断裂释放且断裂深度仅为临界厚度值的60%左右。雪层断裂深度减少40%下雪崩持续时间接近于300 s，并形成1178.5 m^2堆积区，平均堆积深度为1.64 m，堆积量3107.76 m^3，堆积区最大流动速度可达6.58 $m\cdot s^{-1}$，最大冲击力为17.97 kPa。

参考文献（References）：

[1] 王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1529-1536. [Wang Shijin, Ren Jiawen. A review of the progresses of avalanche hazards research[J]. Progress in Geog-

raphy, 2012, 31(11): 1529-1536.]

[2] Katja Laute, Achim A. Beylich. Morphometric and meteorological controls on recent snow avalanche distribution and activity at hillslopes in steep mountain valleys in western Norway[J]. Geomorphology, 2013, 218: 16-34.

[3] 文谨, 陈思齐. 青藏高原及其周边地区的雪崩灾害及应对策略研究[J]. 今日科苑, 2021, 25(7): 83-89. [Wen Jin, Chen Siqi. Research on the snow avalanche disasters over the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas and corresponding coping strategies [J]. Modern Science, 2021, 25(7): 83-89.]

[4] 杨金明, 张旭, 毛炜峄, 等. 中国天山雪崩灾害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 188-197. [Yang Jinming, Zhang Xu, Mao Weiyi, et al. Investigation and analysis of snow avalanche disaster in Tianshan Mountains of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(1): 188-197.]

[5] Liu Yang, Chen Xi, Qiu Yubao, et al. Mapping snow avalanche debris by object-based classification in mountainous regions from Sentinel-1 images and causative indices[J]. Catena, 2021, 206: 105559.

[6] 郝建盛, 李兰海. 雪崩灾害防治研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 762-770. [Hao Jiansheng, Li Lanhai. Progress and prospect of avalanche disaster prevention and control research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 762-770.]

[7] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513, 540. [Li Deren, Li Ming. Research advance and application prospect of Unmanned Aerial Vehicle remote sensing system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 505-513, 540.]

[8] 胡可, 陈思思, 王俊伟. 无人机载红外载荷在应急测绘中的应用[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 60-64. [Hu Ke, Chen Sisi, Wang Junwei. The application of infrared UAV playload in emergency mapping support[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(10): 60-64.]

[9] 鲁恒, 李永树, 李何超, 等. 无人机影像数字处理及在地震灾区重建中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 533-538, 573. [Lu Heng, Li Yongshu, Li Hechao, et al. Digital processing of unmanned aerial vehicle images and its application in reconstruction of Wenchuan earthquake-stricken areas[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(4): 533-538, 573.]

[10] 赵星涛, 胡奎, 卢晓攀, 等. 无人机低空航摄的矿山地质灾害精细探测方法[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 49-52, 64. [Zhao Xingtao, Hu Kui, Lu Xiaopan, et al. Precise detection method for mine geological disasters using low-altitude photogrammetry based on unmanned aerial vehicle[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(6): 49-52, 64.]

[11] 彭大雷, 许强, 董秀军, 等. 无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J]. 地球科学进展, 2017, 32(3): 319-330. [Peng Dalei, Xu Qiang, Dong Xiujun, et al. Application of unmanned aerial vehicles low-altitude photogrammetry in investigation and evaluation of loess landslide [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(3): 319-330.]

[12] Eirik Malnes, Markus Eckerstorfer, Yngvar Larsen, et al. Remote Sensing of Avalanches in Northern Norway Using Synthetic Aperture Radar[C]. International Snow Science Workshop Grenoble, 2013.

[13] Yang Jinming, He Qing, Liu Yang. Winter-spring prediction of snow avalanche susceptibility using optimisation multi-source heterogeneous factors in the Western Tianshan Mountains, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(6):1340.

[14] Markus Eckerstorfer, Stian Solbo, Eirik Malnes. Using "Structure-from-Motion" photogrammetry in mapping snow avalanche debris [J]. Vienna, 2015, 21: 171-178.

[15] Gao Hongkai, He Xiaobo, Ye Baisheng, et al. Modeling the runoff and glacier mass balance in a small watershed on the Central Tibetan Plateau, China, from 1955 to 2008[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(11): 1593-1603.

[16] Voellmy A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen[J]. Sch-weizerische Bauzeitung, 1964, 73: 159-165.

[17] Salm B, Burkhard A, Gubler H U. Berechnung von Fliess-lawinen: Eine anleitung fuer Praktiker; mit Beispielen[J]. Mitteilungen des Eidgenoessischen Instituts fuer Schnee-und Lawinenforschung, 1990, 47: 1-37.

[18] 杨明军, 康冰锋, 韩丹. 基于LiDAR和倾斜摄影测量技术的实景三维自动化建模方法[J]. 科技资讯, 2018, 16(33): 93-96. [Yang Mingjun, Kang Bingfeng, Han Dan. Automated modeling method for real-world 3D based on LiDAR and inclined photogrammetry[J]. Science and Technology Information, 2018, 16(33): 93-96.]

[19] 管建军, 王俊豪, 王双亭, 等. 无人机倾斜摄影在黄土地区泥石流灾害调查与评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 137-145. [Guan Jianjun, Wang Junhao, Wang Shuangting, et al. Application of UAV oblique photography in investigation and evaluation of debris flow disasters in loess area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2017, 28(4): 137-145.]

[20] 闫烨琛, 高学飞, 于向吉, 等. 无人机倾斜摄影测量技术在地质灾害隐患调查中的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(17): 193-196. [Yan Yechen, Gao Xuefei, Yu Xiangji, et al. Research on the application of UAV inclined photogrammetry technology in the investigation of geologic hazards[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(17): 193-196.]

[21] 王靖文, 唐志光, 邓刚, 等. 1991—2021年天山融雪末期雪线高度遥感监测研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1385-1397. [Wang Jinwen, Tang Zhiguang, Deng Gang, et al. Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in Tianshan Mountains from 1991 to 2021[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1385-1397.]

[22] 苗运玲, 于永波, 霍达, 等. 中天山北坡冬季降雪变化及其影响因子分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 9-18. [Miao Yunling, Yu Yongbo, Huo Da, et al. Analysis of winter snowfall variability and

its influencing factors on thenorth slopes of the middle Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(1): 9−18.]

[23] 汶林科, 向灵芝, 蔡毅, 等. 雪崩的形成机理研究[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 1−11. [Wen Linke, Xiang Lingzhi, Cai Yi, et al. Research on the formation mechanism of avalanche[J]. Mountain Research, 2016, 34(1): 1−11.]

[24] Schweizer J, Jamieson J B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches[J]. Cold Regions Science and Technology, 2001, 33(2−3): 207−221.

[25] 王彦龙. 我国的干雪雪崩[J]. 冰川冻土, 1986, 8(4): 381−387. [Wang Yanlong. Dry-snow avalanches in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(4): 381−387.]

[26] 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 等. 气温变化条件下融雪速率和土壤水分变化的同步观测试验[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 890−897. [Guo Lingpeng, Li Lanhai, Xu Junrong, et al. Experimental study on simultaneous observation of snowmelt and soil moisture content under air temperature increase[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 890−897.]

[27] Ahmet Şasi, Murat Yakar. Photogrammetry modelling of sekihan masjid using an unmanned aerial vehicle[J]. Turkish Journal of Engineering, 2017, 1(2): 39−44.

[28] 何敬, 李永树, 鲁恒, 等. 无人机影像的质量评定及几何处理研究[J]. 测绘通报, 2010, 56(4): 22−24, 35. [He Jing, Li Yongshu, Lu Heng, et al. Research of UAV image quality evaluation and geometry processing[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 56(4): 22−24, 35.]

[29] Cao Duanguang, Zhang Baolei, Zhang Xiaobo, et al. Optimization methods on dynamic monitoring of mineral reserves for open pit mine based on UAV oblique photogrammetry[J]. Measurement, 2023, 207: 112364.

[30] 桂德竹, 林宗坚, 张成成. 倾斜航空影像的城市建筑物三维模型构建研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(4): 140−142. [Gui Dezhu, Lin Zongjian, Zhang Chengcheng. Research on construction of 3D building based on oblique images from UAV[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(4): 140−142.]

[31] Marco Martini, Tommaso Baggio, Vincenzo D´Agostino. Comparison of two 2−D numerical models for snow avalanche simulation [J]. Science of the Total Environment, 2023, 896: 165221.

[32] Christen M, Kowalski J, Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain[J]. Cold Regions Science & Technology, 2010, 63(1−2): 1−14.

[33] 胡汝骥, 马维林, 王存牛. 中国天山的雪崩及其治理[J]. 冰川冻土, 1987, 9(S1): 13−24, 150. [Hu Ruji, Ma Weilin, Wang Cunniu. Avalanches in Tianshan Mountains, China, and their control[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1987, 9(S1): 13−24, 150.]

[34] 胡汝骥, 迟国彬, 马维林, 等. 天山西部雪崩防治的研究[J]. 干旱区地理, 1981, 5(1): 39−46. [Hu Ruji, Chi Guobin, Ma Weilin, et al. Research on avalanche control in the western Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography, 1981, 5(1): 39−46.]

[35] 胡汝骥, 马维林, 魏文寿, 等. 我国天山降雪与季节性雪崩的基本物理特征[J]. 干旱区地理, 1985, 8(1): 57−61. [Hu Ruji, Ma Weilin, Wei Wenshou, et al. Basic physical characteristics of snowfall and seasonal avalanches in the Tianshan Mountains of China[J]. Arid Land Geography, 1985, 8(1): 57−61.]

[36] 邱隆君. 基于数字高程模型的重力中区地形改正[J]. 地质论评, 2023, 69(S1): 395−396. [Qiu Longjun. Gravity exploration medium- zone terrain correction based on digital elevation model[J]. Geological Review, 2023, 69(S1): 395−396.]

[37] 张宏鸣, 樊世豪, 陈茹雪, 等. 基于数字高程模型的淤地坝地区河网提取方法[J]. 农业机械学报 2023, 54(9): 246−253, 269. [Zhang Hongming, Fan Shihao, Chen Ruxue, et al. Research on channel network extraction method in check dam area based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 246−253, 269.]

[38] Christen Marc, Bartelt Perry, Kowalski Julia. Back calculation of the in den Arelen avalanche with RAMMS: Interpretation of model results[J]. Annals of Glaciology, 2010, 51(54): 161−168.

[39] Buhler Y, Christen M, Kowalski J, et al. Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution [J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(58): 72−80.

[40] Jamieson Bruce, Johnston Colin D. Snowpack factors associated with strength changes of buried surface hoar layers[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 30(1−3): 19−34.

[41] 王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12−26. [Wang Jian, Che Tao, Li Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 12−26.]

[42] 张志忠. 天山巩乃斯河谷公路雪崩防治研究的初步结果[J]. 冰川冻土, 1981, 3(4): 65−71, 120. [Zhang Zhizhong. Preliminary results of avalanche prevention and control studies on highways in Kunes Valley, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(4): 65−71, 120.]

Numerical simulation of avalanche process in Aerxiangou, West Tianshan Mountains, based on air-ground cooperative investigation

ZHANG Tianyi[1,2], LIU Jie[1,2], YANG Zhiwei[2], WANG Bin[2], CHENG Qiulian[1,2]
(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Technology Research and Development Center, Urumqi 830006, Xinjiang, China)

Abstract: This study was implemented to accurately identify the avalanche flow characteristics and flow information, and comprehensively analyze avalanche motion. This study was based on UAV tilt photography technology to obtain high-resolution aerial photography data, taking the avalanche-prone area of Aerxiangou as an example. Through on-site investigation and UAV remote sensing interpretation to detect avalanche activity in a high-resolution manner, the goals were to determine the input parameters of the RAMMS model, to simulate and reconstruct different types of avalanche events on this basis, and to comparatively analyze the differences among the results of conventional ground-based investigation, UAV remote sensing interpretation, and simulation results to explore avalanche activity in different types and different snow layer release conditions. The results of the study show that (1) the avalanche investigation and analysis system based around tilt photography technology, which combines conventional ground-based investigation methods with UAV remote sensing and numerical simulation to verify each other, improves the accuracy of the assessment of disaster development status. (2) In mid-February, the snow on the slopes of Aerxiangou approaches the critical thickness value, and continuous snowfall destabilizes the snow layer and triggers new avalanches. The investigation is still in the disaster breeding stage, the snow layer cracks intensified deformation, the role of the wind snow eave self-weight gradually increased, there is more than the trend of the breaking strength of the snow, and the overall stability is poor. (3) In slope-type avalanches with a snow platform above the slope surface as the potential release area, the release volume can reach 8.2669×10^4 m^3, the movement duration is about 128 s, and the flow height of the accumulation area peaks in 120 s at about 3.55 m, the flow velocity is about 18.34 $m\cdot s^{-1}$, and the impact force is about 32.67 kPa. In addition, the accumulation area is formed into an accumulation with an area of 3369.7 m^2 and a volume of 1.8525×10^4 m^3 of the pile. Through mutual verification, the slope-type avalanche does not involve release of the snow platform, and there is a discrepancy between the ground-based investigation results and numerical simulation interpretation results. (4) Trench-slope composite avalanches are released by fracture of the snow layer on the trench-slope, where the depth of fracture is only about 60% of the critical thickness value, the avalanche duration is close to 300 s in this case, and the impact range is 1178.5 m^2 in the accumulation area, with an average accumulation depth of 1.64 m. The flushing-out volume is 3107.76 m^3, the maximum flow rate in the accumulation area is 6.58 $m\cdot s^{-1}$, and the maximum impact force is 17.97 kPa. The results of the ground-based investigation are roughly the same as those of the numerical simulation based on the 3D model. The results of the study have improved the accuracy with which avalanche event information can be acquired and can provide strong data support and a scientific basis for predicting future avalanche potential hazards, risk avoidance, and disaster emergency response.

Keywords: avalanche; unmanned aerial vehicle; oblique photography; numerical simulation; motion feature